

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСХОДНЫХ И ОБЛУЧЕННЫХ СВЕТОДИОДОВ GaP

О.В. Конорева, Е.В. Малый, И.В. Петренко, М.Б. Пинковская, В.П. Тартачник

Институт ядерных исследований НАН Украины,

пр. Науки, 47, Киев, 03028, Украина, myrglory@yahoo.com, evgen.malyj@gmail.com

Исследовались серийные красные (GaP:Zn,O) и зеленые (GaP:N) светодиоды, облученные при комнатной температуре электронами с $E = 2$ МэВ в импульсном режиме. Измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) в интервале температур 77 - 300 К. При низких температурах ($T < 90$ К) и малых токах ($I < 10$ мА), кроме описанной в литературе S-образной неустойчивости, найден дополнительный участок отрицательного сопротивления. Обнаружено, что обратный ток обусловлен туннелированием носителей при $U_{обр} \leq 9$ В и лавинным умножением – при $U_{обр} \geq 13$ В; в пределах $U_{обр} = 9 - 13$ В принимают участие оба механизма. Возрастание тока в области высоких напряжений ($U_{обр} > 19$ В) ограничивается сопротивлением базовой части диода. При значительных обратных токах ($I > 1$ мА) облучение диодов приводит к смещению обратных вольт-амперных характеристик (ВАХ) в сторону больших напряжений.

Введение

Фосфид галлия – широкозонный полупроводник, на базе которого получают источники видимого света. На данном этапе его рекомбинационные свойства достаточно изучены, что позволяет кристалл и приборы на его основе считать модельными объектами для исследования влияния внешних факторов на оптоэлектронные характеристики. На пути повышения квантового выхода диодов GaP лежит проблема снижения концентрации безызлучательных уровней в кристалле, решение которой невозможно без накопления информации о свойствах структуры. Пучки ускоренных частиц – удобный инструмент для их контролируемого введения, изменения вида и концентрации. С помощью проникающего излучения можно корректировать и унифицировать характеристики приборов.

Генерация световых мощностей – основная функция светодиодов. Однако, принимая участие в формировании, обработке и передаче информационных потоков, они могут поддаваться влиянию значительных обратных напряжений. Известно [1], что в диодах GaP при обратном смещении возникают микроплазмы – точечные источники излучения широкого спектрального диапазона, которые увеличивают уровень шумов прибора и могут быть причастными к формированию паразитных сигналов, сбоев в работе, отказов и ложных срабатываний контрольно-регулирующей аппаратуры [2]. Не менее серьезной угрозой для нормальной работы электронных модулей и оптоэлектронных схем является случай, когда в результате совокупного взаимодействия многочисленных микроплазм на ВАХ возникает резкий участок лавинного умножения носителей, ток возрастает на несколько порядков и возникает опасность короткого замыкания. При обратном смещении, одновременно с лавинным механизмом, может также проявляться влияние туннелирования носителей, особенно нежелательное для высокочастотных цепей.

Анализ отклонений ВАХ от типичных зависимостей $I(U)$ дает возможность обнаружить причины аномалий, разработать методы неразрушающего влияния на факторы, способствующие их возникновению, предложить способы унификации и модификации характеристик приборов, работающих на основе внутреннего усиления тока в области лавинного пробоя (лавинные фотодиоды,

транзисторы, лавинно-пролетные диоды, стабилитроны) [1, 3].

Прогнозирование радиационной устойчивости современных контрольно-регулирующих устройств и технологическое использование пучков быстрых частиц с целью коррекции параметров приборов в нужном направлении – актуальные задачи в случае работы в условиях проникающего излучения.

Эксперимент

Исследовались светодиоды из фосфида галлия, изготовленные эпитаксиальным способом на подложке, полученной из выращенного методом Чохральского монокристалла – зеленые GaP (N) и красные – GaP (Zn,O) светодиоды. Измерения ВАХ проводились в интервале температур 77 - 300 К автоматизированным комплексом в режимах генератора тока и генератора напряжения. Облучение электронами проводилось на ускорителе ИЛУ-6 в импульсном режиме при температуре, не превышающей комнатную.

Результаты и их обсуждение

Обнаружено, что при малых дозах облучения ($\Phi = 10^{14} - 10^{15}$ э/см²) в области незначительных положительных смещений диодов (~ до 3 В) прямой ток через p-n-переход возрастает (рис. 1а).

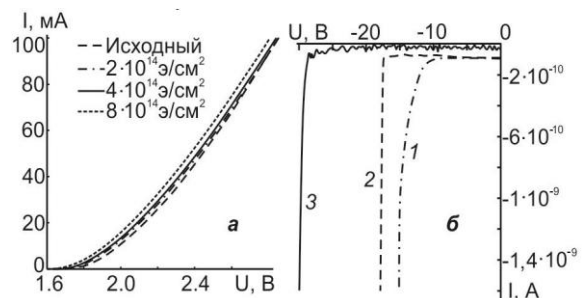


Рис. 1. ВАХ зеленого светодиода при $T = 300$ К после облучения разными дозами электронов: а – прямые, б – обратные (1 - $8 \cdot 10^{14}$ э/см²; 2 - $1,2 \cdot 10^{15}$ э/см²; 3 - $8 \cdot 10^{16}$ э/см²).

Величины обратных токов насыщения I_s как красных, так и зеленых диодов близки к 10^{-10} А; электронное облучение частично стабилизирует эту ветку ВАХ, сдвигая пробойную часть в область больших отрицательных напряжений (рис.1-б). Очевидно, что подобное «улучшение»

ВАХ под действием радиации обусловлено падением подвижности носителей тока в облученных образцах, которое приводит к уменьшению длины свободного пробега [4]. Нестабильности, характерные для больших доз (рис. 16, кривая 3) порождаются микроплазменными пробоями.

На рис. 2 показан типичный вид обратной ветви ВАХ красного диода при комнатной и азотной температурах. Охлаждение образца до 77 К приводит к сдвигу кривой в сторону меньших напряжений; при этом на зависимости $I(U)$ выделяется область резкого возрастания тока до -30 мА и более пологий участок при больших смещениях.

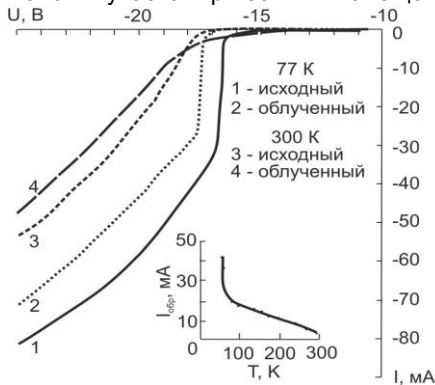


Рис. 2. Обратные ветви ВАХ исходного и облученного электронами ($E = 2$ МэВ, $\Phi = 8 \cdot 10^{14}$ э/см²) красного GaP-диода при комнатной и азотной температурах для интервала токов $I = 0 - 90$ мА. На вставке показана температурная зависимость обратного тока на участке лавинного пробоя.

Известно, что при напряжении $U_1 > \frac{6E_g}{q}$ основным механизмом пробоя является процесс лавинного умножения носителей; если $U_2 < \frac{4E_g}{q}$ – протекание тока обусловлено туннелированием [5]. Для фосфида галлия ($E_g^{300K} = 2,24$ эВ) $U_1 \approx 13$ В, $U_2 \approx 9$ В – значит участок в пределах $I = 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$ А вероятнее всего связан с формированием лавины. Дополнительным подтверждением существования лавинного механизма пробоя являются как температурный сдвиг этого участка, так и резкое уменьшение его величины при 300 К (рис. 2, вставка). Когда температура достигает комнатной, в области лавинного пробоя зависимость тока через $p-n$ -переход от напряжения на нем задается соотношением Миллера [1]:

$$I = \frac{I_0}{1 - \left(\frac{U}{U_n}\right)^n} \quad (1)$$

где U_n – напряжение лавинного пробоя, при котором коэффициент умножения носителей $\mu = I/I_0$ приближается к бесконечности; I_0 – ток, входящий в область пространственного заряда. Численный показатель $n = 5$ свойственный электронам, $n = 3$ – дыркам.

Оценки показывают, что когда $n = 5$, величина тока I в конце пробойного участка составляет $2,58 \cdot 10^{-2}$ А; если же $n = 3$, то $I = 4,24 \cdot 10^{-2}$ А. Следовательно, пробой в пределах $I \approx 0,1 - 3 \cdot 10^{-2}$ А обеспечивают оба вида носителей, причем электронная компонента преобладает. Пологая часть

кривой $I_{обр}(U)$ ($I = 3 \cdot 10^{-2} \cdot 7 \cdot 10^{-2}$) может быть подана в виде линейной функции $I = 10^{-2}(-10,54 + 0,61U)$ с наклоном $R_6 = 162$ Ом.

Выполнение закона Ома неопровержимо свидетельствует о решающем влиянии сопротивления базы на прохождение тока. Облучение диода электронами с $E = 2$ МэВ, $\Phi = 8 \cdot 10^{14}$ э/см² приводит к сдвигу кривой $I_{обр}(U_{обр})$ в сторону больших напряжений, что в значительной мере проявляется в низкотемпературной области (рис. 2). В интервале 100 - 300 К температурная зависимость величины обратного тока – линейна. В пределах 77 – 300 К $I_{обр}$ уменьшается лишь в два раза, что обусловлено небольшой дозой облучения. Тенденция к уменьшению величины $I_{обр}$ в результате облучения, очевидно, является следствием влияния радиационных дефектов на подвижность носителей.

Необходимо отметить, что преобладание лишь одного из механизмов пробоя – лавинного или туннельного – на ВАХ не наблюдается. Подтверждением сделанного вывода могут служить кривые $I_{обр}(U_{обр})$, снятые при температурах 77 К и 300 К в широком диапазоне токов и напряжений (рис. 3)

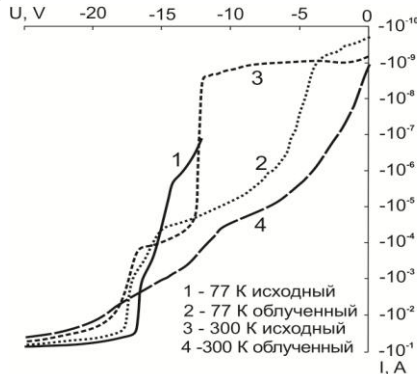


Рис. 3. Обратные ветви ВАХ исходного и облученного электронами красного GaP-диода при комнатной и азотной температурах в пределах $I = 10^{-10} - 10^{-1}$ А.

За направлением температурного сдвига можно определять влияние определенного механизма на формирование участка ВАХ. Если речь идет об туннельных токах, следует иметь в виду, что происходит не зона-зонное туннелирование, а туннельный переход носителей из зоны разрешенных энергий на дефектные состояния, возможный лишь при совпадении уровня носителя с положением уровня дефекта. В нашем случае внешнее напряжение является фактором, изменяющим энергию носителя. Поскольку близко расположенных уровней в запрещенной зоне может быть несколько, возникают точки пересечения ВАХ, разделяющие лавинные и туннельные области.

На рис. 4 показаны обратные ВАХ зеленых GaP-светодиодов, полученные при разных температурах. Их главной особенностью, в отличие от красных диодов (рис. 3), является отсутствие пробойных участков в низкотемпературной области (почти до $U = -10$ В, за исключением ВАХ при 300 К), что свидетельствует о более высоком уровне совершенства $p-n$ -перехода.

Можно предположить, что изоэлектронный атом замещения N_p зеленых образцов деформирует потенциал решетки в меньшей мере, чем парное замещение $Zn_{Ga}-O_p$ в красных. При высоких уровнях легирования, необходимых для обеспечения достаточной величины квантового выхода, вероятно возникновение скоплений пар $Zn-O$, способных как деформировать края зон, так и выполнять роль локальных центров туннелирования зона-дефект-зона.

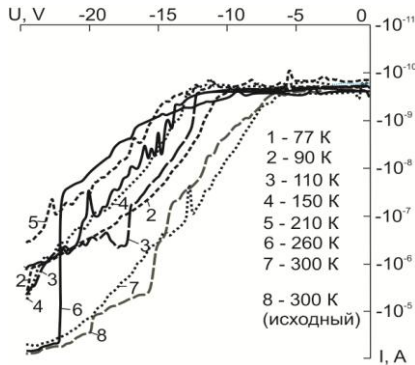


Рис. 4. Обратные ветви ВАХ зеленых светодиодов GaP, облученных электронами ($E = 2$ МэВ, $\Phi = 8 \cdot 10^{14}$ э/см²) при различных температурах в интервале $I = 10^{-10}$ - 10^{-4} А

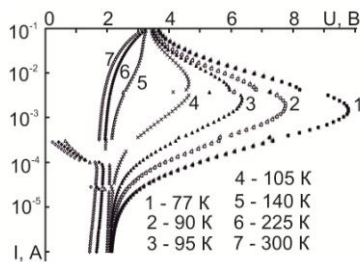


Рис. 5. ВАХ зеленого диода GaP:N для прямого тока при различных температурах.

Как известно, в диодах GaP при низких температурах ($T \leq 90$ К) возникает участок отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС), природа которого обсуждалась в работах [6-8]. Использование прецизионных методик измерения ВАХ позволило обнаружить еще одну область неустойчивости, расположенную ниже (рис. 5). При $T \leq 90$ - 110 К в зеленых диодах она не проявляется.

Из-за отсутствия необходимой информации о нарушениях структуры в обедненной части p - n перехода прийти к однозначному выводу о меха-

низме ее формирования пока сложно. Одним из возможных вариантов причины возникновения неустойчивости может быть эффект двойной инжекции носителей тока в обедненную область перехода. Тогда выход диода из состояния ОДС при $T \leq 150$ К вероятнее всего обусловлен заполнением рекомбинационного уровня, ответственного за формирование отрицательной проводимости.

Закключение

Обнаружено «улучшение» электрических характеристик светодиодов GaP в пределах доз облучения ($\Phi = 10^{14}$ - 10^{15} э/см²), проявляющееся в виде возрастания прямых токов при малых напряжениях (\sim до 3 В) и смещения пробойной ветки ВАХ в область больших напряжений.

Обнаружено, что на обратных ВАХ зеленых и красных GaP-светодиодов существуют участки туннельного и лавинного пробоев. В пределах $I \approx 10^{-1}$ - $3 \cdot 10^{-2}$ А протекание тока обеспечивается участием обоих видов носителей, причем электронная компонента преобладает. При $I > 3 \cdot 10^{-2}$ А основную роль в механизме протекания тока играет сопротивление базы диода; среднее значение этой величины близко к $R_b = 162$ Ом. Облучение диодов GaP приводит к уменьшению обратных токов.

При низких температурах ($T \leq 90$ К) в диодах GaP зафиксировано существование дополнительного участка ОДС. Высказано предположение о возможном участии в ее формировании глубокого рекомбинационного уровня.

Список литературы

1. Грехов И.В., Сережкин Ю.Н. Лавинный пробой p - n перехода в полупроводниках. Л.: Энергия, 1980. 150 с.
2. Гришин Ю.Г., Друзенко Н.В., Конорева О.В., Мосолаб О.О., Опилат В.Я., Тартачник В.П., Ушата Л.В. // Металлофизика и нанотехнологии. 2008. Т.30. С.77-84.
3. Викулин И.М., Курмашев Ш.Д., Горбаев В.Э., Криськи в С.К. // Научные труды ОНАЗ им. О. С. Попова. 2012. №1. С. 57-63.
4. Дубовый В.К., Кочкин В.И., Опилат В.Я. // УФЖ. 2007. Т. 52. № 2. С. 175-179.
5. Ржевский К.С. Физические принципы действия полупроводниковых приборов. М.: Изд. МГУ, 1986. 255 с.
6. Maeda K. // Jap. J. Appl. Phys. 1970. V. 9. № 1. P. 71-80.
7. Bhargava R.N. // Appl. Phys. Lett. 1969. V. 14, № 6. P. 193 - 195.
8. Manzhara V.S., Tartachnyk V.P. // UFZh. 2001. V. 46, № 2. P. 196 - 200.

THE ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS PECULIARITIES OF INITIAL AND IRRADIATED GaP LIGHT-EMITTING DIODES

Oksana Konoreva, Evgen Malyj, Ihor Petrenko, Myroslava Pinkovska, Volodymyr Tartachnyk
Institute for Nuclear Researches, National Academy of Sciences of Ukraine,
Prospect Nauky 47, Kyiv, 03028, Ukraine, myrglory@yahoo.com; evgen.malyj@gmail.com

Serial red (GaP:Zn,O) and LEDs green (GaP:N) irradiated with 2 MeV electrons in pulse mode were investigated. Current-voltage characteristics were measured at 77 - 300 K temperature range. For low temperatures ($T < 90$ K) and small currents ($I < 10$ mA) an additional region of the negative feedback resistance was found except described in the literature the S-shaped instability. It was proposed that current instability appearance is caused by the current carriers double injection effect into the depleted region junction. It was detected that reverse current was caused by the carriers tunneling at $U_{rev} \leq 9$ V and by the avalanche multiplication at $U_{rev} \geq 13$ V; in the range $U = 9 - 13$ V both mechanisms are available. Current increase at high voltage areas ($U_{rev} > 19$ V) is limited by the base resistance of diode. In the case of significant reverse currents ($I > 1$ mA) irradiation of diodes leads to the shift of reverse current-voltage characteristics into the high voltages direction. It was concluded that GaP diodes electrons irradiation in 10^{14} - 10^{15} e/cm² dose range leads to the improving of the electrical characteristics: forward currents increase at low voltages (~ 3 V).